

트러스 벽면과 미세격자 트러스로 구성된 정육면체 단위모델의 강성 및 강도 개발

Development of Effective Stiffness and Effective Strength for a Truss-Wall Rectangular model combined with Micro-Lattice Truss

최정호^{1*}

Jeong-Ho Choi^{1*}

〈Abstract〉

The objective in here is to find the density, stiffness, and strength of truss-wall rectangular (TWR) model which is combined with lattice truss (MLT) inside space. The TWR unit-cell model is defined as a unit cell originated from a solid-wall rectangular (SWR) model and it has an empty space inside. Thus, the empty space inside of the TWR is filled with lattice truss model defined as TWR-MLT. The ideal solutions derived of TWR-MLT are based on TWR with MLT model and it has developed by Gibson-Ashby's theory. To validate the ideal solutions of the TWR-MLT, ABAQUS software is applied to predict the density, strength, and stiffness, and then each of them are compared with the Gibson-Ashby's ideal solution as a log-log scale. Applied material property is stainless steel 304 because of cost effectiveness and easy to get around. For the analysis, SWR and TWR-MLT models are 1mm, 2mm, and 3mm truss diameter separately within a fixed 20mm opening width. In conclusion, the relative Young's modulus and relative yield strength of the TWR-MLT unit model is reasonably matched to the ideal expectations of the Gibson-Ashby's theory. In nearby future, TWR-MLT model can be verified by advanced technologies such as 3D printing skills.t.

Keywords :

Autonomous Traveling Intelligent Robot, Path Planning and Control, Unmanned FA

^{1*} 정회원, 선임연구원, 고정익개발팀,(주)한국항공, 호주 UNSW 대학원 졸업
(e-mail:choicaf@gmail.com, jungho.choi@koreaaero.com)

^{1*} Corresponding Author, Airframe Design Team, KAI, Ph.D The University of New South Wales

1. 서 론

규칙적 세포성 금속 (PCMs)은 지난 몇십년 동안 다양한 형태의 단위셀 모델이 새롭게 개발되어져 오고 있으며, 여러분야에 걸쳐서 응용구조로서 사용되어져 오고 있다. 특히 운송용 수단, 열 차단 및 전도현상, 포장, 그리고 자동화산업등에 응용되어 사용가능성을 증명해 오고 있다¹⁾. 특히, 항공우주산업, 자동차산업, 해양산업, 잠수산업, 건축산업등에 가장 많이 사용되고 현재에도 지속적으로 개발되고 있는 PCM 구조의 인기있는 분야는 샌드위치 패널이다. 그래서, 샌드위치 판넬은 PCM 분야들중에 경량화 구조체로서 사용 가능성을 증명해오고 있다. 경량화 구조체의 핵심내용중에 하나는 강도 대 중량의 비율로서 샌드위치 패널 구조의 핵심 인자이기도 하다. 이들의 주요 사용분야는 방음, 배터리 전극, 촉매, 에너지 흡수와 음향, 진동, 충격에너지 감쇠, 폭 넓은 접촉 면적을 가지는 화학 반응 분야와 필터 및 포장산업^{2,3,4,5)} 등에 적용되고 있다. 따라서, 이들이 이렇게 다방면에 적용되고 있는 이유는 저중량 모델의 특성을 보유하고 있기 때문이다.

가장 일반적인 PCMs의 기본구조는 벌집구조로서 골판지 토폴로지 격자 트러스구조를 기본으로 개발되었다. 벌집구조는 기본적으로 세가지 유형인 육각형, 사각형, 삼각형으로서 지속적으로 개발되고 응용되고 있으며, 적용가능분야에 대해서도 연구중에 있다. 특히 파형 (프리즘) 토폴로지 구조 및 격자 트러스 토폴로지 구조는 많은 잠재성을 가지고 있으며, 삼각 파형 다이아몬드 프리즘 주름, Navtruss, 골판지, 사면체 격자, 피라미드 격자의 3 차원 카고메구조, 다이아몬드형 섬유구조, 다이아몬드 선상구조 등이 현재에도 개발되고 있는 모델이다⁶⁾.

특히 미세 트러스 구조는 가벼운 무게, 비용의

효율성, 다기능성, 여러 형태로 변형 가능한 개방형 다공질 구조의 장점이있다. 적용분야는 구조적 강도, 폭발 보호기능, 탄도 보호력 및 열 교환 등이다. 게다가 트러스 구조는 큰 페이로드를 운반하기에 용이하고, 저장 용량을 증가시키며, 연료 절약이 가능한 장점들을 가졌다.

트러스 구조의 핵심 인자는 셀의 크기와 상대 밀도로서 트러스를 응용한 여러 구조들을 개발하는데 가장 기초적인 인자들이다. 이들 중요인자들을 기본으로 개발된 모델들은 다양한 분야에 적용 가능하며 샌드위치 중간부분 코어 부위에 적용되는 금속제 코어 토폴로지 구조의 최적화를 결정짓는다.

개방형 다공질 셀 또는 미세 트러스 구조인 경우는 현재 자기장 형성 재료, 세라믹스 구조^{7,8)}등에 적용이 되고 있기도 하다.

다양한 분야에 여러 가지 형태로 적용되고 있고 적용되기 위해 개발되고 있는 PCM 에도 단점은 있다. 즉, 무거운 무게, 고밀도성의 일체형 구조이다⁷⁾. 예를 들면, 벌집구조의 경우, 제한된 설계 개념을 가지고 있고, 다기능이 없으며, 외력이 가해졌을 시 벌집구조 내부의 변형등을 근접 확인 및 검사를 할 수 없는 점이 단점이다. 그리고, 구조 연결부위가 쉽게 분리되는 점이다. 금속 발포성 구조인 경우, 유체 흐름을 제한하는 현상을 보이기 때문에 열의 전도 연구분야는 미흡하다.

최근에 관심을 끄는 구조는 HRL 연구소⁸⁾에서 발표한 미세 격자형 구조인 microlattice 의 개발이다. 이 모델은 앞으로 항공기 재료의 경량화, 건설분야 등 여러 분야에 적용 가능한 모델로서 2012년 이후 10대 세계 변화 혁신 중 하나에 포함되는 연구분야이다. 이 격자형 구조의 장점은 우수한 열 및 유체⁷⁾의 유동이 가능하게 하며, 다른 구조들과 융합연결이 가능하며, 폐쇄형 셀 구조보다 연결부위의 수리보수가 더 용이하고, 변형

에 대해 근접 확인이 가능하다는 점이다. 그래서, 이 장점들이 새로운 개방형트러스 구조 모델을 형성하는데 핵심 아이디어가 되었다.

따라서, 이 논문은 새로운 개방형 트러스 구조의 단위셀을 개발하여 가장 기본이 되는 강도와 강성에 대해 연구를 하고자 하는 것이 목적이고, 현재 새로운 연구 구조인 격자형 구조를 집목한 새로운 트러스 구조를 개발하여 해석을 통해 기존의 이론적인 개방형 다공질 구조의 이상적 이론식과 비교를 통해 PCM 구조로서의 가능성을 확인하는 것이다

2. 상대밀도

새로운 단위 셀 모델을 생성하는 중요한 매개 인자는 상대밀도이다. 비례관계를 이용하여 집슨과 애쉬비에 의해 개발된 상대밀도 개념은 다공질 구조의 형상과 상대강도 및 강성을 예측가능하게 하는 기본 개념이다⁹⁾. 상대 밀도는 발포체 자체의 밀도 및 고체 밀도의 비는 중량이 상수 인 경우, 고체 벽 속성의 볼륨 및 발포체 자체의 부피 사이의 비율과 상관 관계로서 정의된다.

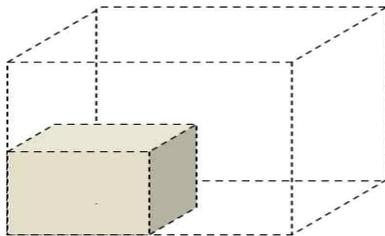


Fig. 1 Schematic model of relative density between volume of solid wall property (solid lines) and volume of foam itself (dotted lines)

따라서 Fig 1에 보여진 바와 같이, 상대 밀도는 상대 부피와 반비례의 상관관계를 형성한다.

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} \propto \frac{V_s}{V^*}$$

여기에서 ρ^* 는 발포체 자체의 밀도이고, ρ_s 는 고체형 벽의 밀도이고, V_s 는 고체 벽 속성의 부피이고, V^* 는 발포체 자체의 부피이다.

따라서 트러스 벽 주름 부 모델의 상대 밀도가 트러스 직경, 개방형 공간 폭, 길이 또는 폭 방향으로 적용되는 트러스의 총 갯수, 길이방향으로 적용되는 트러스의 총 개수, 주름 각의 각도등이 중요 핵심 영향인자가 된다.

3. 상대밀도의 유도식

3.1 고체 벽 정육각형(SWR)

고체 벽 정육면체 모델의 상대밀도를 위한 이상적인 상관식의 유도는 그림 2에 나타난 정사각형 벌집구조로 불려지기도 하는 모델을 기초로 형성된다.

사용된 재료의 부피는

$$V_s = (l \cdot l \cdot h) - h \left(l - \frac{t}{2} \right)^2$$

발포 부피는

$$V^* = (l \cdot l \cdot h)$$

교차된 테트라헤드론 트러스 모델의 상대밀도는

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{t}{l}, t < 4l$$

두께와 길이의 비율은 한가지 조건에 따른다. 즉, 두께는 길이의 4배보다 적다는 것이다.

TWR-MLT 모델과 비교하기 위해, 고체 벽 정육면체 모델에서 두께는 트리스 벽 정육면체 벽면에서 트리스 직경의 두께와 동일하다는 가정을 적용한다. 따라서,

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{d}{l}, d < 4l$$

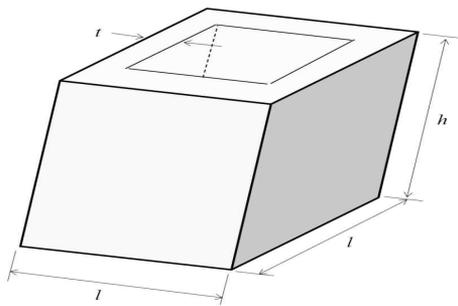


Fig. 2. Unit cell model of solid-wall rectangular model (h = height; l = length, width; t = thickness of solid wall)

3.2 격자 트리스 모델 (MLT)

격자형 트리스 구조의 상대밀도를 위한 이상적인 공식의 유도는 그림 3에 기초를 한다. 적용된 재료의 부피는

$$V_s = l\sqrt{3} \cdot 4 \cdot A$$

여기서, A 는 적용된 트리스의 절단면 면적을 의미하고,

$$A = \pi d^2 / 4$$

절단된 테트라헤드론 트리스 모델을 위한 상대 밀도는

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \sqrt{3}\pi \left(\frac{d}{l}\right)^2$$

3.3 TWR-MLT

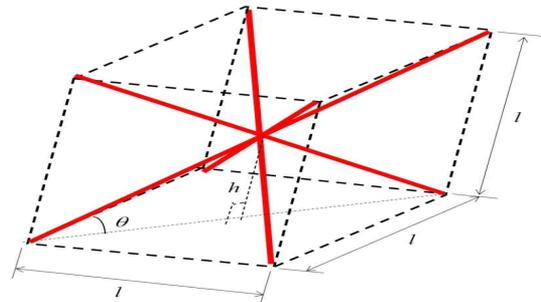


Fig. 3. Schematic diagram for lattice truss (h = height from bottom to center point at crossed trusses; l = length, width or height, as shown by the dotted line; θ = angle between diagonal truss volumetric space and diagonal truss at bottom face)9,10,11,12)

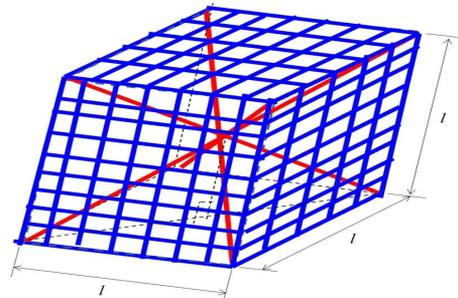


Fig. 4. Schematic unit model of TWR-MLT unit model which is composed of two kinds of struts (red: lattice truss, blue: rectangular truss-wall)

트리스 벽면 정육면체 (TWR) 모델과 격자형 트리스 구조 (MLT)을 결합한 구조가 TWR-MLT 구조이다. 이 모델은 두 개의 모델이 결합된 구조로서 트리스를 기본으로 형성된 복합구조이다. 빈 공간과 트리스의 직경과 공간간격은 고체형 구조의 두께와 동일하다는 가정에서 형성된 구조이기도 하다.

트리스 벽면 정육면체 (TWR) 모델은 고체벽 정육각형(SWR) 구조를 기본으로 하여 형성된 구조로서 고체벽의 두께를 트리스 직경과 공간간격

을 기본으로 형성되는 격자형 트러스 구조로 형성한다면 TWR 구조가 형성된다. SWR 구조는 상면과 하면이 열린상태이다. 그러나, TWR 구조는 자체적으로 공간간격을 포함한 격자형 트러스 구조로 형성되었으며 중앙 부위가 빈 공간을 형성하여 강도가 약할것으로 예상이 되었다. 따라서, 강도를 향상시킬 목적으로 닫힌상태의 정육면체를 구상하였고, 중앙부위의 공간을 격자 트러스 모델(MLT)으로 지지를 하는 구조를 구상한 모델이 TWR-MLT구조이다.

TWR-MLT구조의 상대밀도는 상대부피와 상관관계를 형성하고 총부피는 정육면체 부피와 격자형 구조의 부피의 총합이다.

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} \propto \frac{V_s}{V^*}$$

$$V_s = V_{\text{Rectangular}} + V_{\text{Micro-lattice}}$$

$$V_{\text{Rectangular}} = 3\pi d^2 l$$

여기서 l 은 폭이나 길이에 사용된 총 트러스의 갯수를 의미하고 트러스 직경의 크기와 개방공간은 상관관계를 이루며 $n(d+w)$ 는 폭, $m(d+w)$ 는 길이, $k(d+w)$ 는 높이에서 상관관계를 형성한다. 여기서 n, m, k 는 트러스의 총 개수를 의미한다.

따라서, 이 논문에서는 정육면체의 형상에 중점을 두며, n, m, k 는 동일한 길이 l 내에서 동일한 수의 트러스를 적용한다고 가정하여 $n=m=k$ 로 정의한다. 그래서,

$$V_{\text{Rectangular}} = 3\pi d^2 n(d+w)$$

MLT구조인 경우,

$$V_s = V_{\text{Rectangular}} + V_{\text{Micro-lattice}}$$

그래서,

Table 1. Relative density of TWS, MLT, and TWR-MLT

| Unit model | Relative density, ρ^*/ρ_s |
|------------|---|
| TWS | $\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{d}{l}, d < 4l$ |
| MLT | $\sqrt{3}\pi\left(\frac{d}{l}\right)^2$ |
| TWR-MLT | $(3+\sqrt{3})\pi\left(\frac{d}{l}\right)^2$ |

$$V_s = (3 + \sqrt{3})\pi d^2 l$$

따라서,

$$V^* = V_{\text{Rectangular}}^* + V_{\text{Micro-lattice}}^* = l \cdot l \cdot l$$

여기에서, 총 격자트러스 구조와 트러스 벽면 정육면체 모델 둘 모두의 총 부피는 길이, 길이, 높이가 모두 동일하고 l 이라 정의한다.

그러므로,

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} \propto \frac{V_s}{V^*} = (3 + \sqrt{3})\pi\left(\frac{d}{l}\right)^2$$

그래서,

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} \propto C\left(\frac{d}{l}\right)^2$$

여기서, C 는 상수이고 d 는 트러스의 직경이다. 그래서, 트러스 직경과 폭, 길이, 혹은 높이가 동일한 상수 l 일 때, 상대밀도는 트러스 직경과 폭 길이 비율의 제곱과 상관관계를 이룬다.

표 1에서 MLT, TWS 그리고 TWR-MLT 각각의 상대밀도의 유도식을 정리하였다.

Table 2. Effective stiffness and effective strength values for SWR, MLT, and TWR-MLT 6,13,14)

| Unit model | Effective elastic stiffness $\frac{E^*}{E_s} = \alpha \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2$ | Effective strength $\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_s} = \beta \cdot \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2}$ |
|------------|--|---|
| SWR | $\left(\frac{d}{l} \right)^2, d < 4l$ | $\left(\frac{d}{l} \right)^2, d < 4l$ |
| MLT | $(\sqrt{3}\pi)^2 \left(\frac{d}{l} \right)^4$ | $(\sqrt{3}\pi)^2 \left(\frac{d}{l} \right)^4$ |
| TWR-MLT | $(\sqrt{3}\pi)^2 \left(\frac{d}{l} \right)^4$ | $((3 + \sqrt{3})\pi)^2 \left(\frac{d}{l} \right)^4$ |

4. 기계적 속성

Gibson & Ashby 에 의해 정의된 이상적 슬루션은 9) 강성이 상대적 밀도의 제곱에 비례하고, 강도가 3/2의 제곱 상대 밀도에 비례한다. 이 상관관계는 개방 셀 구조⁹⁾의 상관관계임이 증명된 이상적 이론이다. 따라서, 강성은

$$\frac{E^*}{E_s} = \alpha \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2$$

여기서, E^* 는 발포체 자체 Young's 탄성력, E_s 는 고체 셀 속성의 Young's 탄성력, α 는 상수이며 이것은 항상 일정한 비율의 상수값을 갖는다. ρ^* 는 발포구조 자체의 밀도, ρ_s 는 고체 셀 속성의 밀도이다.

상대 압축 강도는

$$\frac{\sigma_{pl}}{\sigma_s} = \beta \cdot \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2}$$

여기서, β 는 상수로서 항상 σ_{pl} 과 일정한 상수값을 갖는다. σ_{pl} 는 고체 셀 속성에 대한 플라스틱 강도, σ_{ys} 는 발포구조 자체의 항복응력이다.

따라서, 표2 에 Gibson & Ashby 이론에 기초한 각 모델별 강성 및 강도의 상관관계식을 정리하였다.

5. 해석

기계적 강성 및 강도를 모델의 해석을 통해 결과를 확인하였다. 표3 에 해석조건들을 정리하였다. 사용 장비는 ABAQUS 정적해석 기능을 사용하였다. 적용 재료는 AISI304 스테인레스 스틸이고, 메쉬타입은 C3D10, 적용마찰계수는 0.1, 재료의 밀도는 8 kg/cm³, 탄성 영 계수는 200GPa, 푸아송 율은 0.29, 초기 항복응력은 215MPa, 그리고 최대항복응력은 505MPa 이다. 이런 재질을 선택한 이유는 가장 일반적인 금속재질이 스테인레스 스틸로서 구하기 쉽고 저렴한 가격이기 때문이다.

이 재료로 해석을 통해 TWR-MLT 구조의 강도 및 강성을 파악하는 것이 이 논문의 해석 목적이 되겠다.

그림 5에 TWR-MLT 모델의 기본 형상을 나타내었다. 고정되고 동일한 길이, 높이, 폭의 정육면

체에서 트러스의 직경만 커진다면, 이모델의 강도와 강성은 어떤 변화를 보이는지에 대한 해석을 실시하였다.

Table 3. Simulation conditions

| | |
|---------------------------|-------------------------|
| Simulation code | ABAQUS/static |
| Material property | AISI304 stainless steel |
| Mesh type | C3D10 |
| Friction coefficient | 0.1 |
| density | 8 kg/cm3 |
| Young's modulus | 200GPa |
| Poisson ratio | 0.29 |
| initial yielding strength | 215MPa |
| ultimate strength | 505MPa |

Table 4. Simulation conditions

| Unit model | Number of mesh (ea) | Diameter (mm) | | |
|------------|---------------------|---------------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| SWR | Elements | 19305 | 26628 | 97014 |
| | Nodes | 32903 | 43228 | 146559 |
| TWR-ML | Elements | 199968 | 123708 | 148543 |
| T | Nodes | 355431 | 199541 | 227626 |

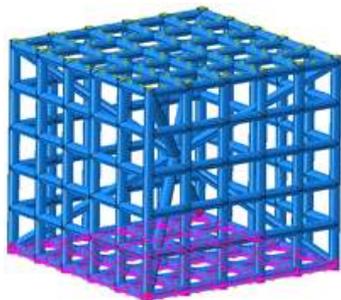


Fig.5. Configuration of TWR-MLT

적용한 경계조건은 그림 5에서 바닥면은 고정된 상태이고 상면이 하부 수직방향으로만 이동한다는 것이다. 즉, $U_x = U_y = U_z = 0$, $R_x = R_y = R_z = \text{free}$ 이고 상단면은 $U_x = U_y = 0$, $U_z = 5 \text{ mm downward}$, $R_x = R_y = R_z = \text{free}$ 으로 정의하여 실행하였다.

6. 해석결과 및 고찰

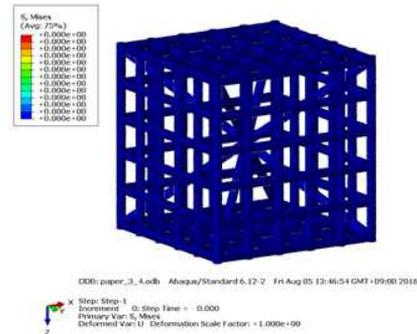


Fig 6. Initial stress distribution

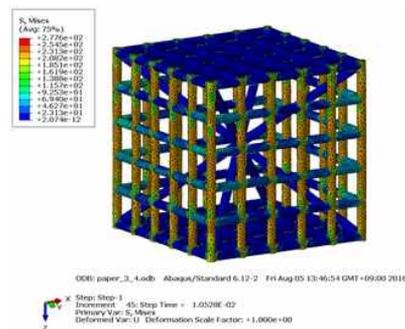


Fig 7. Stress distribution

그림 6 은 모델에 대한 초기 압축강도를 나타내고 있다. 외각에서 지지하는 4부위의 트러스와 가운데에서 지지하는 MLT 트러스에서 높은 압축응력이 발생하는 것을 알 수 있으며, 와이어 직경이 증가할수록 압축 항복강도는 증가하는 것을 알 수 있다.

그림 7은 TWR-MLT 모델의 초기 압축강도를 나타내고 있다. 즉, 수직외부 트러스에 강도가 가해지면서 중앙부분의 MLT로 하중이 이전되면서 강도를 나타낸다. 즉, 공간이 트러스 직경보다 큰 모델의 압축강도를 나타내고 있다. 고정된 공간을 기본으로 트러스 직경만 점점 커짐으로서 공간은 점점 줄어들고 트러스의 간격이 점점 가까워진다.

그림으로써 공간이 없어지게 되면 강도는 더욱 높아지는 것을 보였다.

그림 8은 SWR 모델의 변화율에 대한 반발력을 나타내었고, 그림9는 이 모델의 변화율에 따른 강도를 보인다. 즉, 고정된 공간에서 트러스의 직경이 커짐에 따라 반발력도 증가하고 강도도 증가함을 보인다.

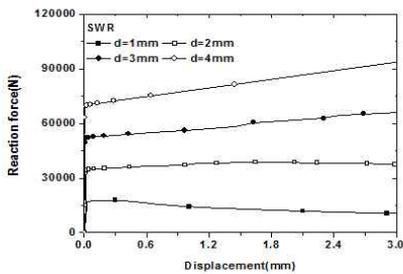


Fig 8. Reaction as a function of displacement for SWR

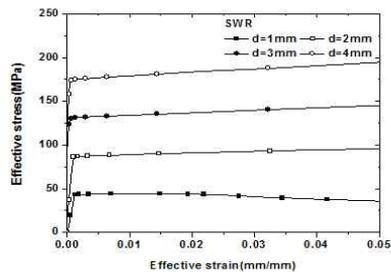


Fig 9. Effective stress as a function of effective strain

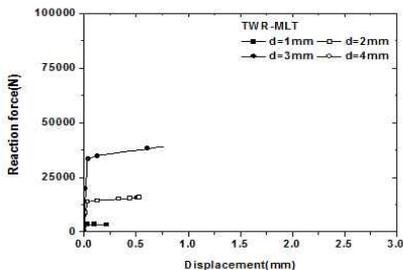


Fig 10. Reaction as a function of displacement for TWR-MLT

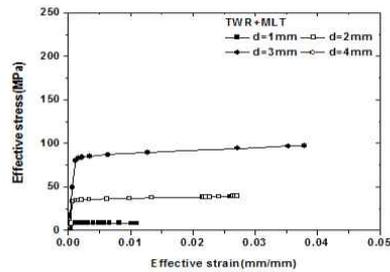


Fig 11. Effective stress as a function of effective strain for TWR-MLT

그리고, TWR-MLT 모델에 대한 반발력과 강도의 결과를 그림 10과 그림 11에서 보인다. 이 모델도 역시 동일하게 트러스의 두께가 증가함에 따라 반발력과 강도는 증가한다.

SWR 모델과 동일한 결과를 보이지만, SWR 모델보다는 반발력과 강도에서 낮아보인다. 이유는 SWR 은 밀집된 고체형태로 구성된 모델이고, TWR-MLT 모델은 SWR 모델과 동일한 부피에서 트러스와 공간으로 구성된 모델이다. 즉, 공간이 있으므로 트러스가 굽힘이나 꺾임이 쉽게 일어나므로 고체형 SWR 모델보다는 강도가 약함이 보였다.

따라서, 각 모델별 유한요소해석 결과는 아래 표 5~6 에 정리하였다.

그림12~14 은 표 5~6 을 바탕으로 상대밀도와 Young 탄성계수, 압축 강도간의 관계를 Gibson&Ashby 의 이론식과 비교한 결과를 나타내고 있다.

그림 12는 단위 셀 모델 TWR-MLT와 Gibson & Ashby 의 관계식에 대한 상대 밀도와 탄성계수간의 관계를 Log-Log scale 로 나타낸다.

Gibson&Ashby 의 관계식과 비교한 결과, TWR-MLT 모델이 낮은 탄성력을 보였고 트러스 직경이 증가함에 따라 Gibson & Ashby 이론식과 유사한 패턴으로 탄성력이 증가됨을 보였다. 따라서, TWR-MLT 모델의 상대 강성은 개방형 구조의 Gibson & Ashby 이론식과 유사하지만 낮은 결과를 보인다.

Table 5. Simulated results of SWR

| d (mm) | E*(GPa) | E*/Es | ρ^*/ρ_s | σ^*/σ_s | $\sigma_{0.25}/\sigma_s$ |
|--------|---------|--------|-----------------|---------------------|--------------------------|
| 1 | 35.51 | 0.1776 | 0.05 | 0.200 | 0.1983 |
| 2 | 97.00 | 0.4850 | 0.10 | 0.399 | 0.3882 |
| 3 | 437.10 | 2.1855 | 0.15 | 0.603 | 0.8511 |

Table 6. Simulated results of TWR+MLT

| d (mm) | E*(GPa) | E*/Es | ρ^*/ρ_s | σ^*/σ_s | $\sigma_{0.25}/\sigma_s$ |
|--------|---------|--------|-----------------|---------------------|--------------------------|
| 1 | 8.567 | 0.0428 | 0.0000019 | 0.0389 | 0.0396 |
| 2 | 51.588 | 0.2579 | 0.00048 | 0.1551 | 0.1815 |
| 3 | 77.594 | 0.3879 | 0.01249 | 0.3732 | 0.3931 |

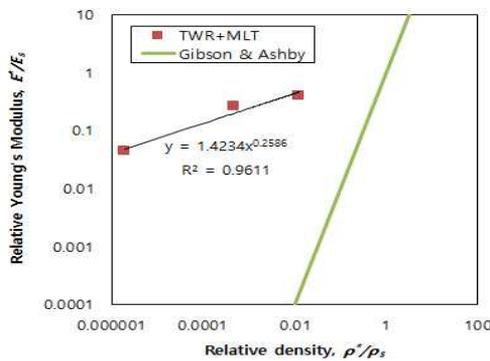


Fig 12. Relative Young's modulus as a function of relative density

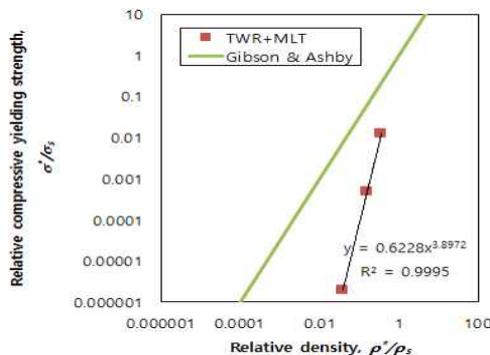


Fig 13. Relative compressive yielding strength at 25% as a function of relative density

그림 13는 단위 셀 모델 TWR-MLT와 Gibson & Ashby의 관계식에 대한 상대 밀도와 초기 압축성 항복 강도의 관계를 나타낸다.

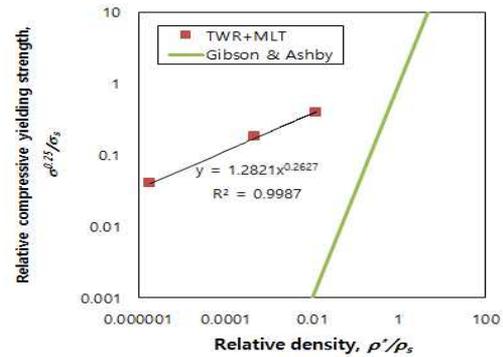


Fig 14. Relative compressive yielding strength as a function of relative density

그림 13에 보인대로, 초기압축 항복력은 상대 밀도가 증가함에 따라서 증가함을 보였다. 그리고, Gibson & Ashby 이론식보다 높은 압축강도를 보였다. 즉, 기울기가 더 높은 현상을 보인 것이다.

따라서, TWR-MLT모델의 해석결과 트러스 직경이 증가함으로 인해 상대 압축강도는 증가하는 현상을 보였다. 즉, 상대밀도가 증가함에 따라서 상대 압축강도도 증가된다는 Gibson&Ashby의 관계식과 유사한 패턴을 보인 것이다. 그러므로, TWR-MLT 모델은 초기 압축 항복강도에 대해 Gibson&Ashby의 이상적인 이론식과 비슷한 압축항복강도를 보임으로써 개방형 셀 구조의 한 모델임이 증명되었다.

마지막으로 그림 14는 단위 셀 모델 TWR-MLT와 Gibson&Ashby의 관계식에 대한 압축항복 강도를 25% 변위구간에서 확인한 결과이다. 즉, 상대밀도가 증가함에 따라서 25%변위에서 상대 압축강도가 증가함을 보였으나, Gibson-Ashby의 이론식과는 낮은 압축강도를 보였다. 즉, 25% 구간에서 압축강도가 낮은 결과를 보인 것이다. 따라서, TWR-MLT모델은 Gibson & Ashby의 개방형 구조에 대한 이상적인 이론식과 유사함을 보였으나 낮은 결과를 보였다. 하지만 이 모델은 개방형 구조 모델의 한부분임을 보였다.

7. 결론

본 연구에서는 기본에 개발된 미세격자구조를 이용하여 새로운 단위 셀 구조를 제시하였고, 이 구조는 유한요소해석을 한 결과, Gibson&Ashby의 관계식과 이론적으로 유사함을 보이기는 하였으나, 탄성력과 25% 압축강도에서는 많이 낮은 결과를 보였다. 이유는 동일한 부피에서 트러스와 열린 공간으로 구성된 트러스 구조는 열린공간으로 인해 강도와 강성이 낮아짐을 증명한 것이다. 그러나, 트러스 직경이 커지면서 열린 공간이 채워지면서 사라지면 강도 및 강성이 증가됨을 확인하였다.

기존의 Gibson&Ashby의 탄성력과 압축강도에 대한 이상적인 이론식이 TWR-MLT 모델에도 적용 가능하며 유사한 패턴의 결과를 보이며 이상적인 이론식을 증명한 것이다. 따라서, 본 연구에서 제시한 모델인 TWR-MLT 모델도 Gibson & Ashby의 개방형 다공질 구조의 한 부분에 포함이 됨을 증명하였다. 앞으로 이 구조를 3d 프린팅 기술 같은 새로운 제조법을 접목하여 실제적인 모델의 제작과 연구에 적용이 되기를 바라며, 이 논문에서 제시한 이론식과 해석결과와 종합적인 비교분석을 통해 좌굴의 영향성등을 포함하여 증명이 되기를 바란다. 앞으로 개방형 다공질 구조체에 대한 지속적인 연구가 되기를 바라며, 항공재료의 경량화 샌드위치 구조 개발에 TWR-MLT 모델이 적용되기를 기대해 본다.

기 호

| | |
|----------|-------------------------------|
| α | 비례상수 |
| β | 비례상수 |
| d | 트러스 와이어 직경 |
| w | 개방형 공간폭 |
| ρ^* | 발포체 자체 밀도[kg/m ³] |

| | |
|-----------------|---------------------------------|
| ρ_s | 사용재료의 밀도[kg/m ³] |
| E^* | 발포체 자체 Young's탄성력 |
| E_s | 사용재료의 Young's 탄성력 |
| C | 임의의 상수 |
| h | 높이 [m] |
| σ^* | 초기 항복응력 |
| σ_{ys} | 사용재료의 일반적 항복응력 |
| σ_{pl} | 플라스틱 응력 |
| $\sigma_{0.25}$ | 25% 변화율에서 발생하는 플라스틱 응력 |
| m | 폭 방향에 적용되는 총 트러스 갯수 |
| n | 총 트러스 갯수 |
| b | 폭 [m] |
| V^* | 발포체 자체의 부피[m ³] |
| V_s | 고체 셀 벽 속성의 부피 [m ³] |
| l | 주름형 구조에서 빗면의 길이[m] |
| t | 주름형 와이어 격자층 단위모델의 두께 [m] |
| FE | 유한요소 |
| U_x | x 축 방향에서 길이 변화 [m] |
| U_y | y 축 방향에서 길이 변화 [m] |
| U_z | z 축 방향에서 길이 변화 [m] |
| R_x | x축 방향에서 회전 변화 [m] |
| R_y | y축 방향에서 회전 변화 [m] |
| R_z | z축 방향에서 회전 변화 [m] |
| SWR | 고체 벽 정육면체 모델 |
| MLT | 미세 격자형 트러스 모델 |
| TWR-MLT | 트러스벽 정육면체와 미세격자 트러스 접목된 모델 |

참고문헌

- [1] Gumruk R., Mines R.A.W., Compressive behaviour of stainless steel micro-lattice structures, *Int. J. Mech. Sci.* 68 pp.125-139, (2013)
- [2] Rejab M.R.M., Cantwell W.J., The mechanical behaviour of corrugated-core sandwich panels, *Compos.: Part B*, 47, pp.267 - 277,(2013)
- [3] Zhang G., Wang B., Ma L., Xiong J., and Wu L., Response of sandwich structures with pyramidal truss cores under the compression and impact loading, *Compos. Struct.* 100, pp.451 - 463, (2013)
- [4] Jeong J., Lee Y., Cho M., Sequential multiscale analysis on size-dependent mechanical behavior of micro/nano-sized honeycomb structures, *Mech. Mater.* 57, pp.109 - 133, (2013)
- [5] Schaedler T.A., Jacobsen A.J., Torrents A., Sorensen A.E., Lian J., Greer J.R., Valdevit L., Carter W.B., Ultralight metallic microlattice, *Science* 334, pp.962 - 965, (2011)
- [6] Wadley H.N.G., Multifunctional periodic cellular metals, *Phil. Trans. R. Soc. A* 364, pp.31 - 68, (2006)
- [7] Cellular Materials International, Inc., Retrieved April 12, (2013)
<http://www.cellularmaterials.com/advantages.asp>
2013-04-13
- [8] Sterling R., (October 29, 2012). "The world's lightest material". Boeing. Archived from the original on 2 November 2012. Retrieved November 2,(2012)
http://www.boeing.com/Features/2012/10/bds_hrl_10_29_12.html
- [9] Gibson L.J., Ashby M.F., *Cellular Solids-Structure and Properties*, 2nded.,CambridgeUniversityPress, Cambridge,(1997)
- [10] Schaedler, T., Jacobsen, A.J., Torrents, A., Sorensen, A.E., Greer, J.R., Valdevit, L., Carter, W.B., Ultralightt Metallic Microlattices, *Science* 18 Vol.334, No.6058, pp.962-965, 2011
- [11] Ushijima, K., Cantwell, W.J., Mines, RAW, Tsopanos, S., and Smith, M, An Investigatioon into the compresive properties of stainless steel micro-lattice structures, *Journal of Sandwich Structures and Materials*, pp.1-27, 2010
- [12] Gumruk, R., Mines, RAW, Compressive behaviour of stainless steel micro-lattice structures, *International Journal of Mechanical Science*, 2013
- [13] Tincher B., Study of Aluminum Honeycomb Structures using Finite element Analysis, Master thesis, Embry-Riddle Aeronautical University, Daytona Beach, FL, USA, (2011)
- [14] Wang A.J., McDowell D.L., In-plane stiffness and yield strength of periodic metal honeycombs, *J. Eng. Mater. Technol.* 126, pp.137 - 156, (2004)

(접수:2016.08.27.,수정:2016.09.02, 게재확정:2016.09.08)